

天然气管道全自动焊接工艺参数优化研究

郭伟, 金金, 李家权, 王建宇

中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2025年9月26日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

天然气管道全自动焊接工艺参数对焊接质量至关重要。通过对焊接电流、电压、焊接速度等参数的研究, 分析其对焊缝成型、焊接强度等的影响。采用科学方法优化参数, 以提高焊接效率与质量, 降低成本, 为天然气管道建设提供可靠的工艺支持。

关键词

天然气管道, 全自动焊接, 工艺参数优化

Research on Parameter Optimization of Fully Automatic Welding Process for Natural Gas Pipeline

Wei Guo, Jin Jin, Jiaquan Li, Jianyu Wang

China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: September 26, 2025; accepted: November 20, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

The fully automatic welding process parameters for natural gas pipelines are crucial for welding quality. By studying parameters such as welding current, voltage, and welding speed, analyze their effects on weld formation and welding strength. Using scientific methods to optimize parameters to improve welding efficiency and quality, reduce costs, and provide reliable process support for natural gas pipeline construction.

Keywords

Natural Gas Pipeline, Fully Automatic Welding, Process Parameters Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着天然气管道建设的不断发展，全自动焊接技术应用广泛。然而，焊接工艺参数的选择直接影响焊接质量和效率。深入研究参数优化，能提升管道焊接的整体水平，保障天然气输送安全，具有重要的现实意义。

2. 工艺参数研究

2.1. 焊接电流分析

焊接电流在天然气管道全自动焊接工艺中是一个极为关键的参数。焊接电流的大小直接影响着焊缝的熔深、熔宽以及焊接接头的力学性能。当焊接电流较小时，焊缝熔深不足，可能导致焊缝强度不够，容易出现焊接缺陷，如未焊透等情况。而焊接电流过大时，虽然熔深增加，但会使熔宽过大，可能产生咬边、飞溅等缺陷，并且会使焊接热影响区增大，影响管道的性能。同时，焊接电流还与焊接材料、管道壁厚等因素相互关联。例如，对于较厚壁厚的天然气管道，往往需要较大的焊接电流来确保足够的熔深，但这个电流又不能超过一定限度以免对管道材质造成不良影响。所以，对焊接电流的精确分析和合理控制是保证天然气管道焊接质量的重要前提。

2.2. 焊接电压探讨

焊接电压在天然气管道全自动焊接中同样起着重要作用。焊接电压主要影响焊缝的形状和外观质量。合适的焊接电压能够使焊缝表面平整、光滑，成型良好。如果焊接电压过低，电弧长度较短，熔滴过渡不稳定，容易造成焊缝表面不平整，出现高低不平的情况，并且可能使熔深不均匀。反之，焊接电压过高时，电弧过长，会导致熔池不稳定，产生气孔、夹渣等缺陷的可能性增加[1]。此外，焊接电压与焊接电流之间存在着一定的匹配关系。不同的焊接电流需要相应合适的焊接电压来协同工作，以达到最佳的焊接效果。例如，在一定范围内，随着焊接电流的增加，焊接电压也需要适当提高，以维持稳定的电弧和良好的熔滴过渡。

3. 参数优化方法

3.1. 试验设计策略

采用全因子试验(Full Factorial Design)和响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)进行天然气管道全自动焊接工艺参数优化的试验设计。全因子试验需确定多个焊接工艺参数，如焊接电流、电压、焊接速度、保护气体流量等作为因子，每个因子设定多个水平。例如，焊接电流设为 100 A、120 A、150 A 三个水平。按照全因子组合进行焊接试验。响应曲面法在此基础上，构建焊接工艺参数与响应变量(如焊缝强度、外观质量等)之间的数学模型[2]。对于数据处理，先对试验数据进行均值、标准差等统计分析，再通过方差分析检验各因子及其交互作用对响应变量的显著性，绘制响应曲面图直观呈现参数与结果的关系。

通过现场调研和专家访谈，选取如下三个主要影响因子：

因子名称	符号	单位	水平范围
焊接电流	A	A	180, 200, 220

焊接电压 V V 20, 24, 28

焊接速度 S cm/min 30, 35, 40

每个因子设定 3 个水平, 组成全因子试验: $3^3 = 27$ 个试验点。

试验 编号	电流 A (A)	电压 V (V)	焊接速度 S (cm/min)	焊缝宽度 (mm)	强度 (MPa)	熔深 (mm)
1	180	20	30	6.2	550	3.5
2	180	20	35	6.1	540	3.2

27	220	28	40	7.0	590	4.1

共计 27 组实验, 采用同一型号的 X80 钢管, 全自动焊接设备一致。每组试验重复 3 次, 取平均值。

主要响应指标如下:

- 焊缝强度(MPa);
- 熔深(mm);
- 焊缝宽度(mm)。

3.2. 数据分析手段

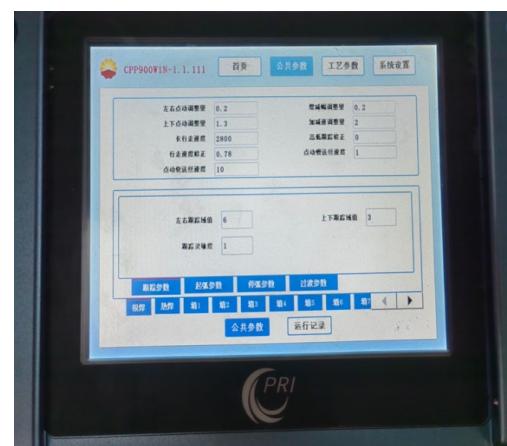
对于天然气管道全自动焊接工艺参数优化而言, 数据分析手段是从大量试验数据中获取有用信息的关键。统计分析方法是常用的手段之一, 如均值分析、方差分析等。均值分析可以得到不同工艺参数组合下焊缝质量指标(如强度、硬度等)的平均水平, 从而初步判断哪些参数组合可能更有利于焊接质量。方差分析则可以评估不同因素对焊接质量影响的显著性程度, 确定哪些因素是主要影响因素, 哪些是次要影响因素。另外, 回归分析也是重要的数据分析手段。现场使用 Design-Expert 13 或 Minitab 21 进行三因素三水平全因子方差分析, 判断主效应和交互作用是否显著, 采用二次多项式回归模型拟合响应面:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

其中 Y 为响应变量, X_i 为输入变量。利用响应面图和等高线图查找最优工艺区域, 并使用多响应优化法则(如 Desirability Function Approach)确定最优解。通过建立焊接工艺参数与焊接质量之间的回归方程, 可以定量地描述它们之间的关系, 并且可以根据回归方程预测在不同参数取值下的焊接质量, 为参数优化提供依据。



工艺参数响应



公共参数响应

3.3. 优化模型建立

建立优化模型是天然气管道全自动焊接工艺参数优化的核心步骤。基于对焊接工艺参数的研究以及试验数据的分析，项目质量部建立以焊接质量、效率和成本等多目标为函数的优化模型。在这个模型中，焊接电流、电压、速度等工艺参数作为自变量，焊缝质量指标(如焊缝强度、缺陷率等)、焊接效率(单位时间内的焊缝长度)和成本(包括材料成本、能源成本等)作为因变量。例如，可以通过加权法将多目标转化为单目标函数，根据实际需求确定每个目标的权重。然后，利用优化算法(如遗传算法、粒子群算法等)对模型进行求解，找到满足要求的最优工艺参数组合，以实现焊接质量、效率和成本的综合优化。

4. 优化效果评估

4.1. 焊缝质量检测

焊缝质量检测是评估优化效果的关键。从外观上看，焊缝应平整、光滑，无咬边、气孔等缺陷。利用无损检测技术，如超声检测可检测内部缺陷，射线检测可直观呈现焊缝内部结构。通过测量焊缝的强度、硬度等机械性能指标评估质量[3]。例如，将优化前后的焊缝取样进行拉伸试验，对比断裂强度。优化后的焊缝强度应满足管道运行的安全标准，如强度提高 10%~15%。同时，对焊缝的金相组织进行深入分析是判断焊缝质量提升情况的重要环节。金相组织能反映出焊缝内部的微观结构。通过金相显微镜观察晶粒大小，优质焊缝的晶粒应细小且均匀，过大的晶粒可能导致焊缝强度降低、韧性变差。例如，优化前晶粒平均尺寸为 50 微米，优化后若减小到 30 微米则是积极的变化。再观察晶粒形态，良好的焊缝晶粒应呈等轴状，若出现柱状晶或树枝状晶且比例过高，可能意味着存在焊接缺陷或工艺不佳。从这些微观层面的变化，可以更全面地衡量焊缝质量是否在优化后得到有效提升。



焊缝外观检查



热焊焊缝检查

4.2. 焊接效率对比

焊接效率对比需考虑多个方面。一方面是焊接速度，在优化前后对比单位时间内完成的焊缝长度。例如，优化前焊接速度为 15 厘米/分钟，优化后若能提高到 24 厘米/分钟，则效率显著提升。另一方面是焊接的一次性合格率，优化前可能因焊接参数不佳需要多次返修，优化后一次性合格率从 75% 提升到 98%

以上，这意味着在相同时间内可完成更多合格焊缝。同时，还要考虑焊接设备的运行稳定性，优化后设备故障导致的停机时间减少，从而整体提高了焊接效率，减少了整个天然气管道焊接工程的工期。

4.3. 成本效益分析

成本效益分析是全面评估优化效果不可或缺的部分。成本方面，首先考虑焊接材料的消耗，优化焊接工艺参数后，随着焊接质量提高，大幅度减少因焊接缺陷而浪费的材料，如焊丝的用量从每米 0.1 千克降低到 0.08 千克。设备运行成本上，由于优化后焊接效率提高，设备的运行时间减少，电力等能源消耗降低，原来每小时耗电 6 度，优化后降低到 4 度。

效益方面，焊缝质量提升可减少后期管道维护成本，提高管道使用寿命，若管道正常使用寿命从 20 年提高到 25 年，这期间减少的维修和更换成本就是效益。同时，焊接效率的提高使得工程提前完工，节省了人工成本等间接成本。

5. 结束语

通过对天然气管道全自动焊接工艺参数的优化研究，明确了各参数的影响及优化方法。优化后的参数显著提升了焊接质量与效率，降低了成本。未来可进一步拓展研究，为管道焊接技术发展提供更多支持。

参考文献

- [1] 方超华. 天然气管道焊接工艺选择及质量控制探析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(13): 17-18.
- [2] 刘雨果, 韦星, 梁桠东. 探究天然气管道焊接工艺与质量控制措施[J]. 化工管理, 2019(30): 178-179.
- [3] 陆建卫. 高压天然气管道焊接工艺选择及质量控制探讨[J]. 科技资讯, 2020, 18(29): 90-91+95.